引文格式:许国振,任晓东,张小红.CNES多系统OSB产品质量分析及实时精密单点定位性能评估[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(11):2352-2364.DOI:10.13203/j.whugis20230376

Citation:XU Guozhen,REN Xiaodong,ZHANG Xiaohong.Quality Analysis of Multi-GNSS OSB Products from CNES and Its Performance Evaluation of Real-Time Precise Point Positioning[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(11):2352-2364.DOI:10.13203/j.whugis20230376

CNES多系统OSB产品质量分析及实时精密单点定位性能评估

许国振[1] 任晓东[1,2] 张小红[1,2,3]

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 湖北珞珈实验室,湖北 武汉,430079

3 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

摘 要:面向原始观测值的绝对信号偏差(observable-specific signal bias,OSB)为多频多模全球导航卫星系统数据处理提供了一种简单、统一的相位/伪距偏差修正方式,其实时产品质量直接决定了整数解实时精密单点定位(real-time precise point positioning with ambiguity resolution,RT PPP-AR)效果。法国国家空间研究中心(Centre National d'Etudes Spatiales,CNES)作为目前唯一公开提供实时OSB产品的研究机构,推动了多频多系统RT PPP-AR的实际应用。详细分析并评估了CNES实时OSB产品的质量及其RT PPP-AR定位性能,以便为更多实时精密定位用户应用提供参考。实验结果表明,在CNES实时OSB产品质量方面,其产品可用率、稳定性以及精度均具有较好表现。其中,GPS/Galileo/BDS三系统的相位/伪距OSB产品可用率达90%以上,但部分卫星(如G28、E02、E07、E21)可用率仅在40%~90%;GPS/Galileo相位OSB产品稳定性均优于0.1周,BDS稳定性略差于前两者,GPS/Galileo/BDS日平均标准差(standard deviation,STD)分别为0.085、0.117、0.228周;通过OSB修正以后,GPS/Galileo/BDS卫星宽巷和窄巷模糊度残差较小,其在±0.25周以内的百分比分别为92.37%、95.88%、86.58%和88.40%、91.53%、87.42%,可满足PPP模糊度固定的需求。利用多GNSS实验站实测数据验证其RT PPP-AR定位效果,结果表明,基于CNES实时OSB产品可实现动态厘米级RT PPP-AR的定位精度,GPS+Galileo+BDS三系统的RT PPP-AR定位误差在东、北、天方向分别为1.16 cm、0.95 cm和2.78 cm,相比未做OSB修正的浮点解PPP结果,RT PPP-AR的收敛时间可缩短40%以上;基于CNES实时OSB产品可实现BDS单系统模糊度固定,定位精度相比浮点解有显著提升,模糊度固定成功率约为94%。

关键词:实时精密单点定位;模糊度固定;绝对信号偏差;多频多系统

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-06-18

DOI:10.13203/j.whugis20230376 **文章编号**:1671-8860(2025)11-2352-13

Quality Analysis of Multi-GNSS OSB Products from CNES and Its Performance Evaluation of Real-Time Precise Point Positioning

XU Guozhen[1] *REN Xiaodong*[1,2] *ZHANG Xiaohong*[1,2,3]

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Hubei Luojia Laboratory, Wuhan 430079, China

3 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objectives**: The observable-specific signal bias (OSB) provides a simple and unified way for phase/pseudo-range bias correction in multi-frequency and multi-constellation global navigation satellite system (GNSS) data processing. The quality of real-time OSB products directly affects the performance of real-time precise point positioning (PPP) with ambiguity resolution (RT PPP-AR). The Centre National

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB3903902);国家自然科学基金(42388102,42230104);中央高校基本科研业务费专项资金(2042025kf0026)。

第一作者:许国振,硕士,主要从事实时精密单点定位方面的研究。guozxu@whu.edu.cn

通信作者:任晓东,博士,教授。xdren@whu.edu.cn

d'Etudes Spatiales (CNES) is currently the only research institution that publicly releases real-time OSB products which promote the practical applications of multi-frequency and multi-constellation RT PPP-AR. This study evaluate and analyze the quality of real-time OSB products from CNES and their impact on RT PPP-AR solution, aiming to provide a reference for increasing RT PPP users. **Method**: After evaluating the availability and stability of real-time OSB products from CNES, the ambiguity residual distribution situation were statistically analyzed. Simulated kinematic and static positioning experiments were carried out to verify the positioning performance of RT PPP-AR based on real-time OSB products from CNES for several different system combinations. **Results**: Experimental results show that real-time OSB products from CNES demonstrate high availability, good stability and high accuracy. As for the availability of phase/pseudo-range OSB products for GPS/Galileo/BDS systems reaches over 90%, but for some satellites (such as G28, E02, E07, E21), the availability ranges from 40% to 80%. The stability of GPS/Galileo phase OSB products is better than 0.1 cycles, while that of BDS is slightly lower. The daily average standard deviations (STD) for GPS/Galileo/BDS systems are 0.085, 0.117, and 0.228 cycles, respectively. After applying OSB corrections, the residual ambiguity for wide-lane (WL) and narrow-lane (NL) of GPS/Galileo/BDS satellites is small, with percentages within ±0.25 cycles as follows: 92.4%, 95.9%, 86.6% for WL, and 88.4%, 91.5%, 87.4% for NL, which satisfies the requirements for ambiguity fixing in PPP. The real-time PPP-AR positioning accuracy using OSB products from CNES is validated with multi-GNSS experiment observations. The results show that RT PPP-AR using real-time OSB products from CNES can achieve centimeter-level positioning accuracy in dynamic mode. The positioning errors in the east, north, and up directions for GPS+Galileo+BDS RT PPP-AR are 1.16 cm, 0.95 cm, and 2.78 cm, respectively. Compared to float PPP results without OSB correction, RT PPP-AR significantly reduces the convergence time by more than 40%. **Conclusion**: Ambiguity resolution can be achieved under BDS single system based on real-time OSB products from CNES. And the positioning accuracy is significantly improved compared to float solution, while the fixing rate is around 94%.

Key words: real-time precise point positioning; ambiguity resolution; observable specific signal bias; multi-frequency and multi-constellation

精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术[1-3]是利用全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)实现高精度定位服务的一种重要途径。因具有单机作业、机动灵活、全球覆盖等诸多优势,被广泛用于精密农业、海洋测绘、卫星精密定轨等领域[4]。

为满足大众用户实时精密定位需求,国际GNSS服务组织(international GNSS service, IGS)在2001年成立实时工作组(real-time working group, RTWG)并定义实时服务(real time service, RTS)[5]。2007年RTWG正式启动实时计划项目(real time pilot project, RTPP),并于2013年开始提供实时精密产品[6]。随后,多家IGS分析机构(analysis center, AC)开始提供实时产品[7]。其中,德国联邦制图和大地测量局(Federal Agency for Cartography and Geodesy, BKG)提供GPS、GLONASS、Galileo的实时精密轨道、钟差和伪距信号偏差,中国科学院(Chinese Academy of Sciences,CAS)提供GPS、GLONASS、Galileo、北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system,BDS)的实时精密轨道、钟差、伪距信号偏差和电离层天顶方向总电子含量(vertical total electron content,VTEC)等改正参数,法国国家空间研究中心(Centre National d'Etudes Spatiales, CNES)提供GPS、GLONASS、Galileo、BDS的实时精密轨道、钟差、伪距信号偏差、相位信号偏差和电离层VTEC等。相关机构播发实时精密产品的详细情况如表1所示。

国内外学者针对实时精密单点定位(real-time PPP, RT PPP)开展了大量研究[8-11],结果表明,实时精密轨道和钟差产品的精度能够满足用户需要,且RT PPP收敛后能够达到厘米级的定位精度。同时,动态定位模式下,多系统RT PPP仍需要15 min使东(E)、北(N)、天(U)方向的定位精度分别收敛至0.1 m、0.1 m、0.2 m。为了缩短PPP收敛时间,提高定位精度,PPP模糊度固定技术(PPP with ambiguity resolution, PPP-AR)应运而生,成为GNSS精密定位领域的研究热点[12-14]。PPP-AR实现的关键是消除伪距和相位偏差的影响。传统伪距偏差

和相位偏差以差分码偏差(differential code bias,DCB)[15]和相位小数周偏差(fractional cycle bias,FCB)[16]形式表达,是一种相对形式。随着GNSS卫星频率数量的增多,DCB和FCB的种类越来越多,组合形式愈发复杂,为了提供简便、统一的偏差产品,避免因频率选择和观测值组合形式不同带来产品使用的不便,IGS工作组在2016年提出了基于原始观测值的绝对信号偏差[17](observable-specific signal bias,OSB),用于海事无线电技术委员会(radio technical commission for maritime services,RTCM)标准[18],是实时伪距和相位信号偏差播发的唯一形式。目前,针对OSB产品及PPP定位主要以事后产品解算和定位性能分析为主[19-21]。近年来,CNES机构已经开始提供实时OSB产品,也是目前唯一一个提供实时OSB产品的研究机构。但是,针对其实时OSB产品质量及RT PPP-AR定位性能的评估和研究非常少[22],因此,有必要对其进行深入研究。

表1 不同分析机构提供的实时精密产品

Table 1 Real-time Products Provided by Different ACs

机构	卫星系统	产品	间隔/s
GMV	GPS/GLONASS/Galileo/BDS	Orbit/Clock/Code bias	5
BKG	GPS/GLONASS/Galileo	Orbit/ Code bias	60
		Clock	5
ESA	GPS	Orbit/Clock	5
GFZ	GPS/GLONASS/Galileo/BDS	Orbit/Clock/Code bias	5
CNES	GPS/GLONASS/Galileo/BDS	Orbit/Clock/Code bias/Phase bias	5
		电离层VTEC	60
CAS	GPS/GLONASS/Galileo/BDS	Orbit/Clock/Code bias	5
		电离层VTEC	60
WHU	GPS/GLONASS/Galileo/BDS	Orbit/Clock	5
DLR	GPS/GLONASS/Galileo/BDS	Orbit/ Code bias	30
		Clock	5

注:GMV(GMV Innovating Solutions):GMV分析中心;ESA(European Space Agency):欧洲空间局;GFZ(Deutsches GeoForschungs Zentrum Potsdam):波茨坦德国地球科学研究中心);WHU(Wuhan University):武汉大学;DLR(German Aerospace Center):德国宇航中心。

本文首先介绍了CNES提供的实时OSB产品的生成方式及其参数含义,以及非差非组合模糊度固定的方法和原理;然后从可用率、稳定性、非差模糊度残差分布3个方面对CNES提供的实时OSB产品质量进行全面评估与分析;最后基于多GNSS系统实验(multi-GNSS experiment,MGEX)测站,验证基于实时OSB产品的RT PPP-AR定位性能。

1 CNES实时OSB产品生成方法及PPP-AR定位

1.1 CNES实时OSB产品生成方法

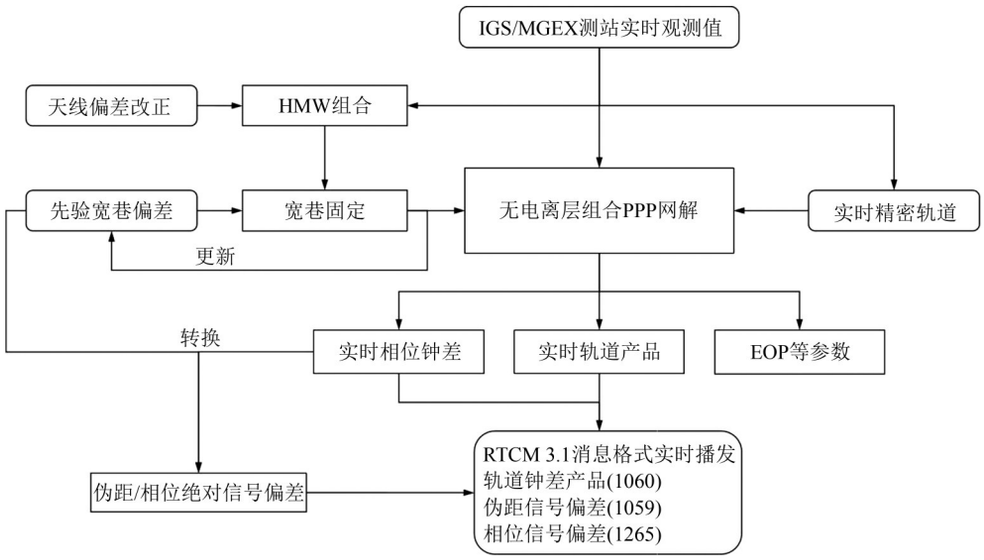
CNES在服务端以整数相位钟的形式[14-15]估计生成伪距信号偏差和宽巷(wide-lane,WL)偏差、相位钟。整数相位钟法生成的产品基于特定的观测值组合,严重制约了用户对非差定位模型和观测值组合形式的选择。因此,LAURICHESSE等[8]提出一种方法,服务端通过网络接收全球MGEX测站实时观测值,根据广播星历和卫星精密定轨的输出,进行无电离层组合PPP解算,通过整数相位钟法生成相位钟差和宽巷偏差之后,将两者转化为各频率的非组合相位信号偏差,CNES基于此提供非组合相位信号偏差并通过网络播发给用户,其实现流程如图1所示。用户可以根据RTCM制定的标准,从RTCM网络传输协议(networked transport of RTCM via internet protocol, NTRIP)服务器上实时接收CNES播发的非组合相位信号偏差产品,同时还有伪距信号偏差、实时精密轨道钟差改正数产品。

下面首先给出非组合PPP定位模型,然后推导由CNES整数相位钟产品至非组合信号偏差产品的转化过程,最后给出基于此的非组合模糊度固定策略。伪距和载波相位原始观测方程为:

$$\begin{cases} P_{r,f}^{s}=\rho_{r}^{s}+\mathrm{d}t_{r}-\mathrm{d}t^{s}+\gamma_{f}\cdot I_{r,1}^{s}+ \\ \qquad T_{r}^{s}+b_{r,f}-b_{f}^{s}+\varepsilon_{r,f}^{s} \\ L_{r,f}^{s}=\rho_{r}^{s}+\mathrm{d}t_{r}-\mathrm{d}t^{s}-\gamma_{f}\cdot I_{r,1}^{s}+ \\ \qquad T_{r}^{s}+\lambda_{f}\cdot(N_{r,f}^{s}+B_{r,f}-B_{f}^{s})+\xi_{r,f}^{s} \end{cases} \tag{1}$$

式中,s、r、f分别表示卫星、接收机和载波频率;$P_{r,f}^{s}$和$L_{r,f}^{s}$分别表示伪距和载波相位观测值;ρ_{r}^{s}表示接收机天线相位中心到卫星天线相位中心的几何距离;$\mathrm{d}t_{r}$和$\mathrm{d}t^{s}$分别表示接收机钟差和卫星钟差;γ_{f}表示电离层映射因子($\gamma_{f}=\lambda_{f}^{2}/\lambda_{1}^{2}$);$I_{r,1}^{s}$表示第一个载波频率上的电离层延迟;$T_{r}^{s}$表示对流层延迟;$b_{r,f}$和$b_{f}^{s}$分别表示第$f$个载波频率上的接收机端和卫星端伪距硬件延迟;$B_{r,f}$和$B_{f}^{s}$分别表示第$f$个载波频率上的接收机端和卫星端相位延迟,单位为周;λ_{f}表示第f个载波频率对应的载波波长;$N_{r,f}^{s}$表示第f个载波频率对应的相位观测值的整周模糊度,单位为周;$\varepsilon_{r,f}^{s}$和$\xi_{r,f}^{s}$分别表示伪距和载波相位观测值的测量噪声与多路径效应之和。

精密钟差改正后得到的重参数化方程的形式为:



注:HMW为Hatch-Melbourne-Wübbena的缩写;EOP(earth orientation parameter):地球定向参数。

图1　CNES的OSB产品实时生成与播发流程

Fig. 1　Real-time Generation and Broadcasting Process of CNES's OSB Products

$$\begin{cases} p_{r,1}^s = \mu_r^s \cdot x + \mathrm{d}\hat{t}_r + \hat{I}_{r,1}^s + m_{r,w}^s \cdot Z_{r,w}^s + \varepsilon_{r,1}^s \\ p_{r,2}^s = \mu_r^s \cdot x + \mathrm{d}\hat{t}_r + \gamma_2 \cdot \hat{I}_{r,1}^s + m_{r,w}^s \cdot Z_{r,w}^s + \varepsilon_{r,2}^s \\ l_{r,1}^s = \mu_r^s \cdot x + \mathrm{d}\hat{t}_r - \hat{I}_{r,1}^s + m_{r,w}^s \cdot Z_{r,w}^s + \\ \qquad \lambda_1 \cdot \hat{N}_{r,1}^s + \xi_{r,1}^s \\ l_{r,2}^s = \mu_r^s \cdot x + \mathrm{d}\hat{t}_r - \gamma_2 \cdot \hat{I}_{r,1}^s + m_{r,w}^s \cdot Z_{r,w}^s + \\ \qquad \lambda_2 \cdot \hat{N}_{r,2}^s + \xi_{r,2}^s \end{cases} \tag{2}$$

式中,$p_{r,i}^s$和$l_{r,i}^s(i=1,2)$分别表示伪距和相位观测值的OMC(observe minus computed);μ_r^s表示接收机到卫星的单位向量;x表示接收机位置的状态增量;$m_{r,w}^s$表示对流层天顶湿延迟的投影函数;$Z_{r,w}$表示天顶对流层湿延迟。部分参数的展开形式如下:

$$\begin{cases} \mathrm{d}\hat{t}_r = t_r + b_{r,\mathrm{IF}} = t_r + (\alpha \cdot b_{r,1} + \beta \cdot b_{r,2}) \\ \hat{I}_{r,1}^s = I_{r,1}^s + \beta \cdot \mathrm{DCB}_{r,12} - \beta \cdot \mathrm{DCB}_{12}^s \\ \hat{N}_{r,1}^s = N_{r,1}^s + (B_{r,1} - B_1^s) + \\ \qquad \left[b_{\mathrm{IF}}^s - b_{r,\mathrm{IF}} + \beta \cdot (\mathrm{DCB}_{r,12} - \mathrm{DCB}_{12}^s) \right] / \lambda_1 \\ \hat{N}_{r,2}^s = N_{r,2}^s + (B_{r,2} - B_2^s) + \\ \qquad \left[b_{\mathrm{IF}}^s - b_{r,\mathrm{IF}} + \beta \cdot (\mathrm{DCB}_{r,12} - \mathrm{DCB}_{12}^s) \right] / \lambda_2 \end{cases} \tag{3}$$

式中,IF(ionosphere free)表示无电离层组合;

$$\begin{cases} \alpha = f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2) \\ \beta = -f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2) \\ \mathrm{DCB}_{r,12} = b_{r,1} - b_{r,2} \\ \mathrm{DCB}_{12}^s = b_1^s - b_2^s \\ b_{r,\mathrm{IF}} = \alpha \cdot b_{r,1} + \beta \cdot b_{r,2} \\ b_{\mathrm{IF}}^s = \alpha \cdot b_1^s + \beta \cdot b_2^s \end{cases} \tag{4}$$

非组合相位信号偏差$\bar{B}_1^s$和$\bar{B}_2^s$可以通过伪距信号偏差$\bar{b}_1^s$、$\bar{b}_2^s$和WL偏差μ_{WL}^s、相位钟(intger recovery clock,IRC)$\mathrm{d}t_{\mathrm{IRC}}^s$进行转化得到。

利用HMW[23]组合计算WL模糊度:

$$\phi_1 - \phi_2 + \eta_1 \cdot P_1 + \eta_2 \cdot P_2 = N_{\mathrm{WL}} + \mu_{r,\mathrm{WL}} - \mu_{\mathrm{WL}}^s \tag{5}$$

理论上,将伪距和相位OSB改正到原始观测值上之后,计算得到的WL模糊度不再包含卫星端硬件延迟:

$$(\phi_1 + \bar{B}_1^s) - (\phi_2 + \bar{B}_2^s) + \eta_1 \cdot (P_1 + \bar{b}_1^s) + \eta_2 \cdot (P_2 + \bar{b}_2^s) = N_{\mathrm{WL}} + \mu_{r,\mathrm{WL}} \tag{6}$$

相位观测值的无电离层组合形式为:

$$\alpha \cdot \lambda_1 \cdot \phi_1 + \beta \cdot \lambda_2 \cdot \phi_2 = \rho_r^s + \mathrm{d}t_r - \mathrm{d}t^s + \lambda_{\mathrm{IF}} \cdot (N_{\mathrm{IF}} + B_{r,\mathrm{IF}} - B_{\mathrm{IF}}^s) \tag{7}$$

用IGS精密钟差改正的方程形式为:

$$\alpha \cdot \lambda_1 \cdot \phi_1 + \beta \cdot \lambda_2 \cdot \phi_2 = \rho_r^s + \mathrm{d}t_r - \mathrm{d}t_{\mathrm{IGS}}^s + \lambda_{\mathrm{IF}} \cdot (N_{\mathrm{IF}} + B_{r,\mathrm{IF}} - B_{\mathrm{IF}}^s) \tag{8}$$

$$\mathrm{d}t_{\mathrm{IGS}}^s = \mathrm{d}t^s + b_{r,\mathrm{IF}} = \mathrm{d}t^s + \alpha \cdot b_1^s + \beta \cdot b_2^s \tag{9}$$

若将相位OSB改正到原始相位观测值上之后,等式右边应不再包含卫星端相位硬件延迟,此时用相位钟改正卫星钟差,得到方程:

$$\alpha \cdot \lambda_1 \cdot (\phi_1 + \bar{B}_1^s) + \beta \cdot \lambda_2 \cdot (\phi_2 + \bar{B}_2^s) = \rho_r^s + \mathrm{d}t_r - \mathrm{d}t_{\mathrm{IRC}}^s + \lambda_{\mathrm{IF}} \cdot (N_{\mathrm{IF}} + B_{r,\mathrm{IF}} - B_{\mathrm{IF}}^s) \tag{10}$$

$$\mathrm{d}t_{\mathrm{IRC}}^s = \mathrm{d}t^s + B_{r,\mathrm{IF}} = \mathrm{d}t^s + \alpha \cdot B_1^s + \beta \cdot B_2^s \tag{11}$$

分别将式(5)代入式(6)、式(8)代入式(10),可以得到:

$$\begin{bmatrix}\bar{B}_1^s\\ \bar{B}_2^s\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{-\lambda_1}{\lambda_2-\lambda_1} & \dfrac{\gamma_2-1}{\gamma_2\cdot\lambda_1-\lambda_2}\\ \dfrac{-\lambda_2}{\lambda_2-\lambda_1} & \dfrac{\gamma_2-1}{\gamma_2\cdot\lambda_1-\lambda_2}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\mu_{\mathrm{WL}}^s-\eta_1\cdot\bar{b}_1^s-\eta_2\cdot\bar{b}_2^s\\ \mathrm{d}t_{\mathrm{IGS}}^s-\mathrm{d}t_{\mathrm{IRC}}^s\end{bmatrix}\tag{12}$$

基于式(12),服务端可以利用伪距信号偏差$\bar{b}_1^s$、$\bar{b}_2^s$和WL偏差μ_{WL}^s、相位钟$\mathrm{d}t_{\mathrm{IRC}}^s$转化得到非组合相位信号偏差$\bar{B}_1^s$和$\bar{B}_2^s$,然后通过网络播发给用户;用户端使用非组合伪距和相位信号偏差产品进行改正时,无需顾及服务端的数学模型和观测值组合形式,可以根据自身需要任意选择。将式(12)简化后,可以得到OSB产品的含义:

$$\begin{cases}\bar{b}_1^s=\beta\cdot(b_1^s-b_2^s)\\ \bar{b}_2^s=-\alpha\cdot(b_1^s-b_2^s)\\ \bar{B}_1^s=B_1^s-b_{\mathrm{IF}}^s/\lambda_1=B_1^s-(\alpha\cdot b_1^s+\beta\cdot b_2^s)/\lambda_1\\ \bar{B}_2^s=B_2^s-b_{\mathrm{IF}}^s/\lambda_2=B_2^s-(\alpha\cdot b_1^s+\beta\cdot b_2^s)/\lambda_2\end{cases}\tag{13}$$

将OSB产品直接改正到原始伪距和相位观测值上,能够消除原始观测值中存在的卫星端伪距和相位硬件延迟,改正后式(3)中模糊度参数的含义为:

$$\begin{cases}\hat{N}_{r,1}^s=N_{r,1}^s+B_{r,1}+\left[-b_{r,\mathrm{IF}}+\beta\cdot\mathrm{DCB}_{r,12}\right]/\lambda_1\\ \hat{N}_{r,2}^s=N_{r,2}^s+B_{r,2}+\left[-b_{r,\mathrm{IF}}+\gamma_2\cdot\beta\cdot\mathrm{DCB}_{r,12}\right]/\lambda_2\end{cases}\tag{14}$$

1.2 多系统PPP-AR定位及模糊度固定策略

经过OSB产品修正后,模糊度参数中不再包含卫星端伪距和相位硬件延迟。采用逐级模糊度固定策略实现PPP-AR定位,首先固定WL,利用HMW组合[24-26]计算WL模糊度:

$$\begin{cases}\lambda_{\mathrm{MW}}\cdot\hat{N}_{\mathrm{MW}}=\left(f_1L_1-f_2L_2\right)/\left(f_1-f_2\right)-\\ \qquad\qquad\left(f_1P_1+f_2P_2\right)/\left(f_1+f_2\right)\\ \lambda_{\mathrm{MW}}=c/\left(f_1-f_2\right)\\ \hat{N}_{\mathrm{MW}}=N_1-N_2+B_{r,\mathrm{MW}}-B_{\mathrm{MW}}^s\end{cases}\tag{15}$$

式中,λ_{MW}为WL波长;$\hat{N}_{\mathrm{MW}}$为WL浮点模糊度。

经过OSB产品修正后,WL模糊度中存在的卫星端硬件延迟部分已经被消除,进一步通过星间单差(single difference,SD)消除其中存在的接收机端硬件延迟,恢复其整数特性:

$$\mathrm{SD}(\hat{N}_{s_i,\mathrm{MW}}^{s_j})=(\hat{N}_{s_i,1}-\hat{N}_{s_i,2})-(\hat{N}_{s_j,1}-\hat{N}_{s_j,2})\tag{16}$$

式中,$\hat{N}_{s_i,\mathrm{MW}}^{s_j}$表示卫星$s_i$和$s_j$的WL模糊度的星间单差值。

HMW组合波长较长(约86 cm),式(16)具备整数特性,采用Round方法取整固定[27]。WL固定之后,构造虚拟观测方程,对状态量进行滤波。从滤波后的状态量中取出$\hat{N}_1$的值,计算$\hat{N}_1$的星间单差值。值得注意的是,虽然

$$\mathrm{SD}(\hat{N}_{s_i,N_1}^{s_j})=\hat{N}_{s_i,1}-\hat{N}_{s_j,2}\tag{17}$$

同样具备整数特性,但由于$\hat{N}_1$的波长较短(约19 cm),测量噪声和多路径效应的影响导致$\hat{N}_1$和N_1的差值可能高达10周[15],同时必须充分考虑不同卫星$\hat{N}_1$模糊度之间的相关性,因此使用最小二乘模糊度降相关平差法[28-30]来固定N_1。固定N_1之后,将其作为虚拟观测值,构建虚拟观测方程对状态量进行滤波,即可得到固定解。

2 实验和结果分析

2.1 实验数据和处理策略

为了评估CNES提供的实时OSB产品质量及其RT PPP-AR全球定位性能,选取全球均匀分布的50个MGEX测站,2022-10-18—2022-11-17年积日(day of year,DOY)291~321共计31 d的观测数据,实时精密产品为CNES的实时轨道、钟差及OSB产品。观测数据和实时精密产品均通过BNC(BKG NTRIP Client)软件实时接收并保存。实验测站全球分布如图2所示。

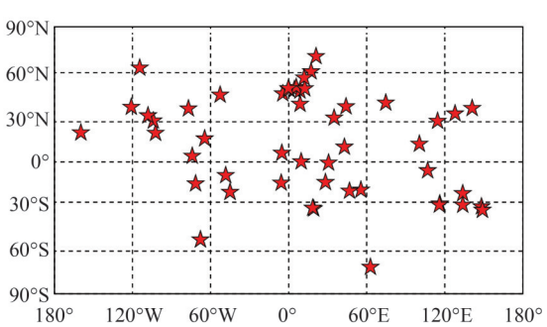


图2 MGEX测站的全球分布图

Fig. 2 Global Distribution Map of MGEX Stations

本文的数据处理策略如表2所示。采用扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)对状态量进行估计。静态定位模式下,接收机坐标当作随机常数估计,动态定位模式下,则视作白噪声估计。相位缠绕采用模型改正[31],天线相位中心偏差和天线相位中心变化采用IGS提供的igs14_wwww.atx文件进行改正[32-34]。由于天线文件中并未给出Galileo和BDS的接收机端天线相位中心改正值,因此,使用信号频率最近的GPS接收机天线相位中心改正值替代。部分模

糊度固定采用数据驱动的高度角优先固定方法，将模糊度子集按照卫星高度角排序，循环剔除高度角最小的卫星直至固定，Ratio检验和Bootstrapping成功率作为判断模糊度固定是否成功的标准。本文RT PPP-AR定位实验采用的各GNSS系统观测值如下：GPS：C1W、L1C、C2W、L2W；Galileo：C1X、L1X、C5X、L5X；BDS：C2I、L2I、C6I、L6I。

表2　PPP AR实验的参数配置

Table 2　Parameter Configuration for PPP AR Experiments

参数	配置
观测值类型	双频伪距和相位观测值
卫星系统	GPS/Galileo/BDS
观测值定权模型	GPS/Galileo/BDS的观测值定权比为1∶2∶2；伪距和相位观测值先验精度分别为0.3 m和1 mm；高度角定权模型为$\sigma^2 = a^2 + b^2 / \sin^2 E$
数学模型	非差非组合
滤波器	扩展卡尔曼滤波
采样率/s	30
截止高度角/(°)	7
精密轨道钟差	CNES实时精密轨道和钟差产品
OSB产品	CNES实时伪距和相位偏差产品
接收机坐标/接收机钟差	白噪声
系统间偏差	随机游走
对流层延迟	干延迟部分使用Saastamoinen模型改正；湿延迟部分视作随机游走估计；对流层投影函数：全球投影函数
电离层延迟	随机游走
天线改正	igs14_wwww.atx
模糊度固定检核	Bootstrapping成功率不低于95%；Ratio值不小于3.0

2.2　OSB产品质量评估

实时OSB产品的可用性是评估其质量的一个重要指标，指OSB产品可用历元数量与总历元数量的比值。图3与图4分别给出了实验期间GPS、Galileo、BDS系统卫星伪距和相位OSB产品的平均可用率情况。可以看到，大部分卫星伪距OSB产品的可用率均为100%，对应相位OSB产品的可用率不足100%。G28、E02、E07、E21卫星伪距OSB产品的可用率在40%～90%之间。C01～C05均为地球静止轨道（geostationary earth orbit，GEO）卫星，其轨道产品质量较差，导致BDS GEO卫星相位OSB产品实时估计精度差，暂不提供实时OSB产品[35-36]。此外，由于实验数据段内C15、C17、C18、C31卫星处于不可用状态，因此CNES也未提供实时OSB产品。

图5给出了CNES提供的2022年DOY 291～321共31天的实时OSB产品时序图。可以看出，伪距OSB的值非常稳定，几乎不变，相位OSB的值则有轻微波动。图6给出了WUM提供的2022年DOY 291～321共31天的事后OSB产品时序图，事后OSB产品无论是伪距还是相位，一天内都只有一个值。表3给出了实验日期内CNES相位OSB产品的日平均标准差（standard deviation，STD）值，WUM提供的事后OSB产品由于一天只有一个值，因此并未进行统计。可以看出，GPS、Galileo、BDS卫星两个频率上相位OSB产品的STD值是相等的。GPS、Galileo相位OSB产品的STD值均不超过0.2周，优于BDS系统的0.228周，说明GPS和Galileo相位OSB产品的稳定性优于BDS。

2.3　模糊度残差分布

伪距和相位OSB产品消除的是卫星端硬件延迟，为了恢复模糊度参数的整数特性，还需要对模糊度参数做星间单差处理，消除接收机端硬件延迟。具体做法是：每个历元选取高度角最大的卫星作为基准星，计算其他卫星与基准星模糊度参数的单差值。这个单差值理论上已经具备整数特性，由于大气残余误差、多路径效应等因素的存在，导致单差值不是严格的整数。经过OSB改正的模糊度星间单差值的小数部分，即模糊度残差，理论上符合零均值的正态分布[37]。图7给出了实验日期内WL和窄巷（narrow-lane，NL）模糊度残差的分布情况，表4给出了相应的统计结果。综合图7综和表4的结果可以看出，经CNES实时OSB产品修正后，GPS、Galileo、BDS WL和NL的模糊度残差均符合标准正态分布。对于WL模糊度残差，GPS、Galileo、BDS在±0.25周内的占比分别为92.37%、95.88%、86.58%，在±0.15周内的占比分别为78.69%、86.47%、74.32%。对于NL模糊度残差，GPS、Galileo、BDS在±0.25周内的占比分别为88.40%、91.53%、87.42%，在±0.15周内的占比分别为71.14%、82.39%、75.27%。

为了对CNES实时OSB产品的质量进行全面评估，利用WUM提供的事后OSB产品进行同样的实验。图8给出了模糊度残差的分布情况，表5给出了相应的统计结果。综合图8和表5的结果可以看出，经WUM事后OSB产品修正后，GPS、Galileo、BDS WL和NL的模糊度残差均同样符合标准正态分布。对于WL和NL模糊度残

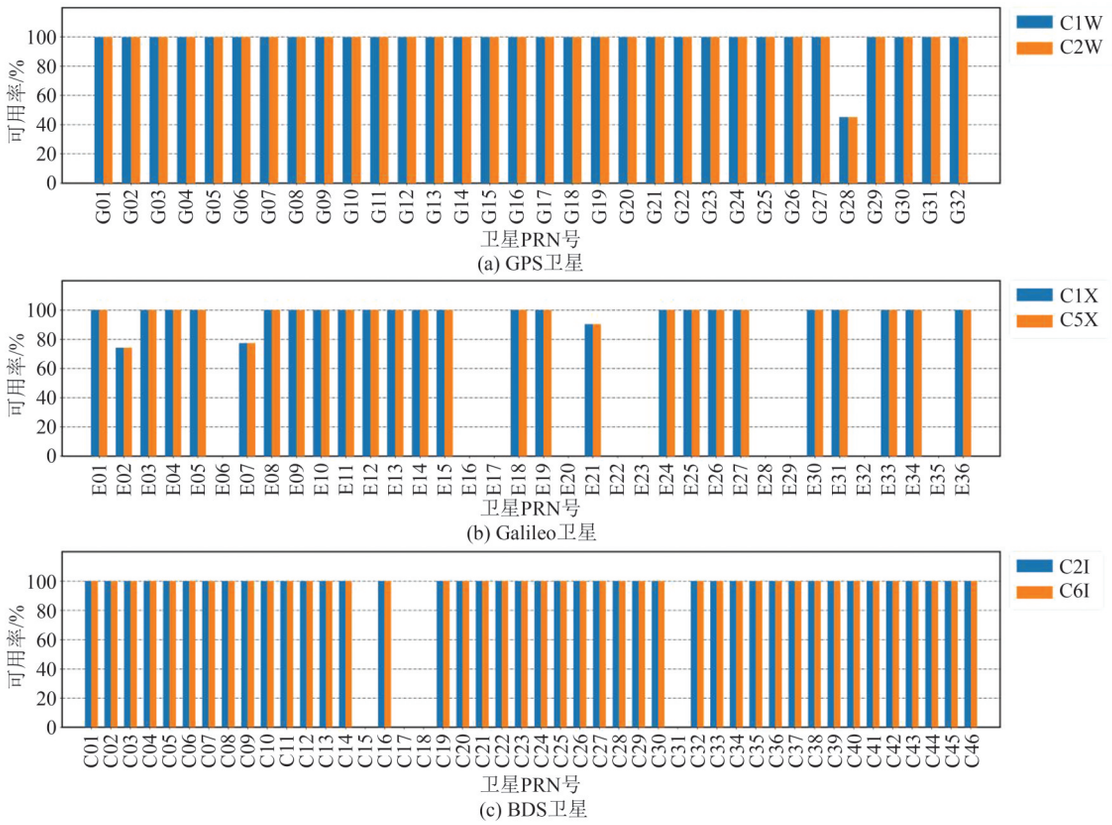


图3 GPS/Galileo/BDS三系统的伪距OSB可用率情况

Fig. 3 Availability of Pseudo-range OSB Products for GPS/Galileo/BDS

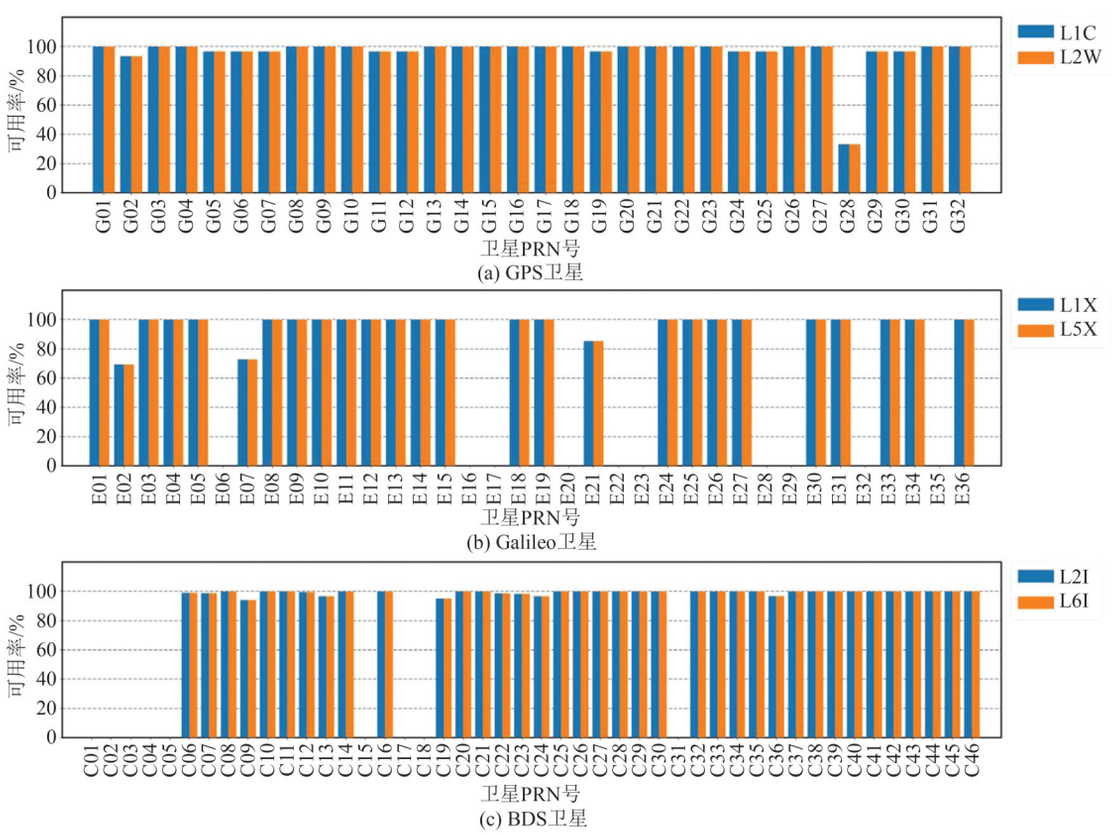


图4 GPS/Galileo/BDS三系统的相位OSB可用率情况

Fig. 4 Availability of Phase OSB Products for GPS/Galileo/BDS

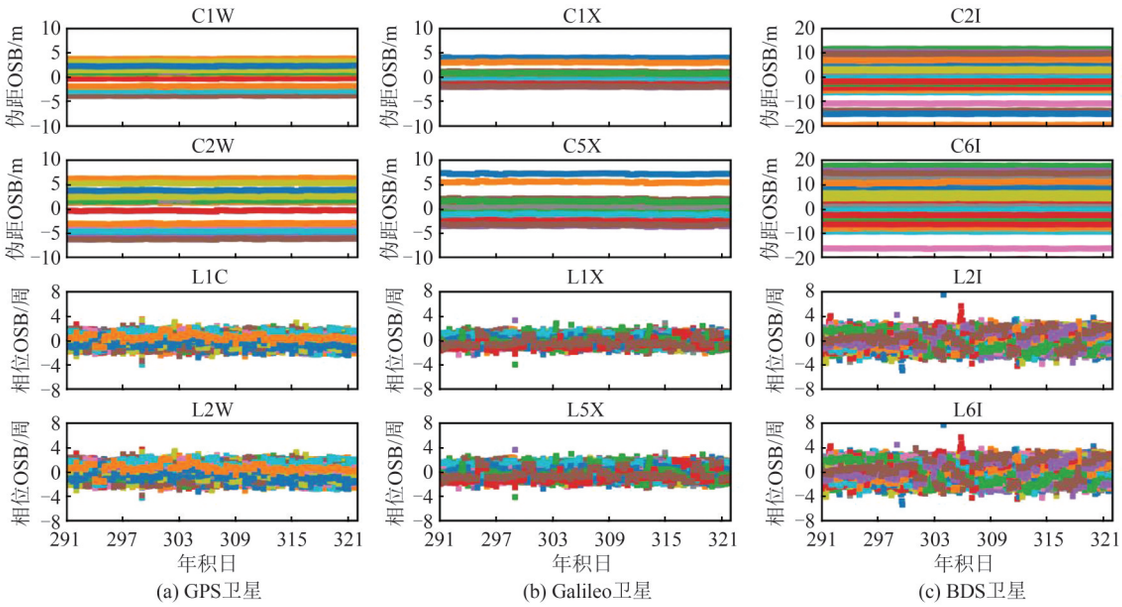


图5　CNES提供的2022年DOY 291～321共31天的实时OSB产品时间序列

Fig. 5　Time Series of CNES's Real-Time OSB Products from DOY 291—321, 2022

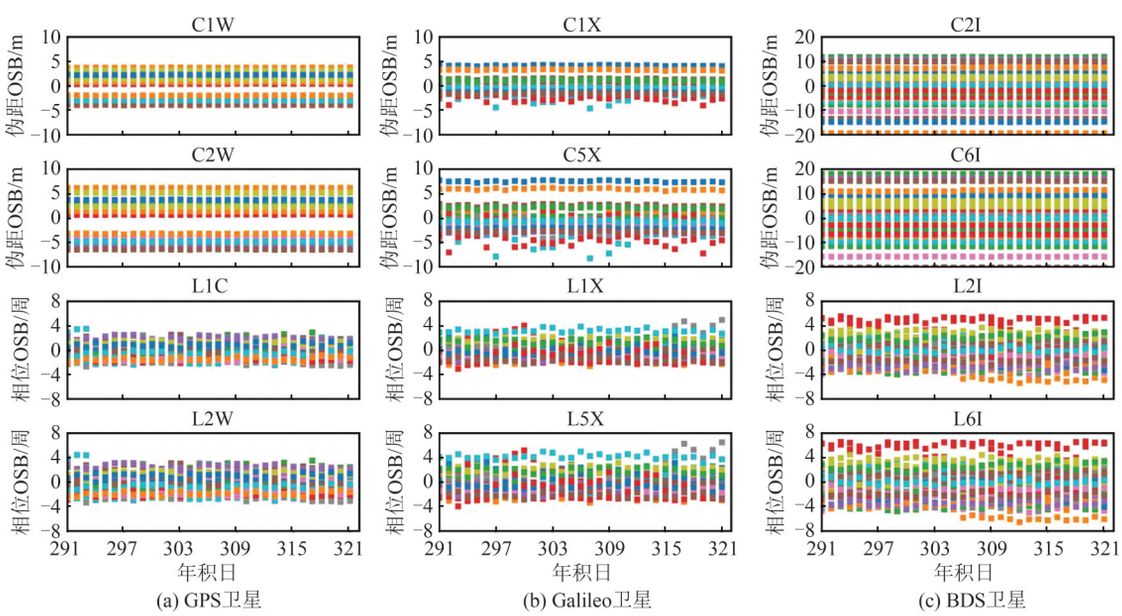


图6　WUM提供的2022年DOY 291～321共31天的事后OSB产品时间序列

Fig. 6　Time Series of WUM's Post OSB Products from DOY 291—321, 2022

表3　CNES相位OSB产品的日平均STD值/周

Table 3　Daily Average STD Value of CNES's Phase OSB Products/cycle

统计项	GPS		Galileo		BDS	
	L1C	L2W	L1X	L5X	L2I	L6I
STD	0.085	0.085	0.117	0.117	0.228	0.228

差,GPS、Galileo、BDS在±0.15周内的占比分别为84.26%、85.30%、76.26%和79.55%、83.36%、76.99%。可以看到,CNES实时OSB产品在恢复模糊度整数特性方面的性能已与WUM事后OSB产品接近。

2.4　基于CNES实时OSB的RT PPP-AR定位验证

本文利用CNES提供的实时轨道、钟差以及OSB产品,分别进行不同组合的静态/动态实时PPP-AR实验,并进行定位精度统计,计算定位误差的均方根(root mean square,RMS)值。各测站坐标的参考真值以IGS提供的坐标文件(SNX文件)为准,收敛准则以各方向定位精度连续10个历元优于0.1 m为准。

图9为动态和静态PPP模型下各测站不同处理策略的精度统计情况。受篇幅限制,图9中只给出14个测站的定位结果。

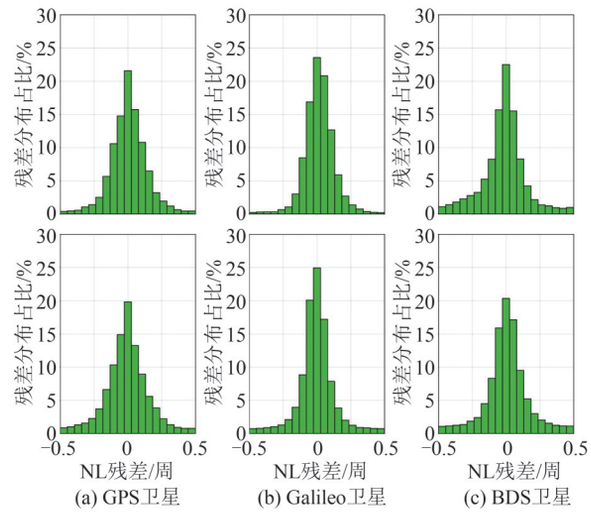


图7 经CNES实时OSB产品修正的GPS/Galileo/BDS模糊度单差值的小数部分

Fig. 7 Fractional Part of Single Differenced Ambiguity for GPS/Galileo/BDS Corrected by CNES's OSB

表4 经CNES实时OSB产品修正的宽巷和窄巷模糊度残差的统计结果

Table 4 Statistic Results of Ambiguity Residuals of WL and NL Corrected By CNES's OSB Products

系统	WL			NL		
	均值/周	±0.25周内占比/%	±0.15周内占比/%	均值/周	±0.25周内占比/%	±0.15周内占比/%
GPS	0.006	92.37	78.69	−0.007	88.40	71.14
Galileo	0.017	95.88	86.47	−0.004	91.53	82.39
BDS	−0.017	86.58	74.32	0.006	87.42	75.27

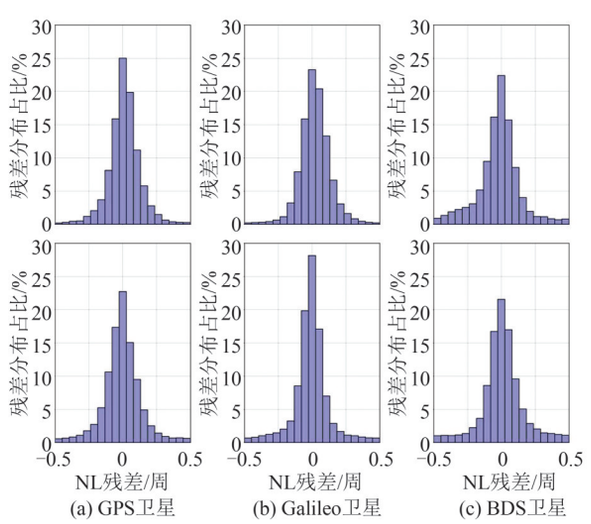


图8 经WUM事后OSB产品修正的GPS/Galileo/BDS模糊度单差值的小数部分

Fig. 8 Fractional Part of Single Differenced Ambiguity for GPS/Galileo/BDS Corrected by WUM's OSB Products

表5 经WUM事后OSB产品修正的宽巷和窄巷模糊度残差的统计结果

Table 5 Statistic Results of Ambiguity Residuals of WL and NL Corrected by WUM's OSB Products

系统	WL			NL		
	均值/周	±0.25周内占比/%	±0.15周内占比/%	均值/周	±0.25周内占比/%	±0.15周内占比/%
GPS	0.011	95.19	84.26	−0.005	91.65	79.55
Galileo	0.022	95.51	85.30	−0.007	91.08	83.36
BDS	−0.020	87.57	76.26	0.010	88.20	76.99

表6给出了动态和静态实时PPP定位误差统计值。由表6可以看出,对单GPS而言,动态定位模式下浮点解和固定解的定位误差在E、N、U方向分别为3.03、1.93、4.47 cm和2.14、1.58、4.00 cm,定位精度提升分别为29.4%、18.2%、10.6%;静态定位模式下,浮点解和固定解的定位误差在E、N、U方向分别为2.42、1.22、3.12 cm和1.60、1.04、2.74 cm,定位精度提升分别为33.8%、14.8%、12.2%。加入Galileo后,定位精度有小幅提升,提升主要体现在U方向。继续加入BDS后,定位精度仍有一定提升。固定解相比浮点解,定位精度提升非常明显,动态PPP固定解收敛后的水平精度优于3 cm,高程精度优于4 cm;静态PPP固定解收敛后的水平精度优于2 cm,高程精度优于3 cm。在固定率方面,3种系统组合的平均固定率均高于98%,GPS、GPS+Galileo、GPS+Galileo+BDS动态定位模式的固定率分别为98.53%、99.10%、98.87%,静态定位模式的固定率分别为98.60%、99.30%、99.01%。

为了直观反映浮点解和固定解收敛速度的差异,每隔3 h重置RT PPP-AR滤波器。图10给出了ABPO测站2022年DOY 291天定位结果的时序图,红色为固定解,蓝色为浮点解。表7给出了定位误差和收敛时间的统计值。值得注意的是,浮点解中并未使用OSB产品或者DCB产品进行改正,这是因为伪距频间偏差并不影响其收敛时间,而本文使用的GPS观测值均为精码,因此不需要修正GPS伪距观测值的频内偏差。由图10可以看出,固定解相比浮点解显著缩短了收敛时间。由表7可以看出,GPS、GPS+Galileo、GPS+Galileo+BDS 3种组合静态模式下浮点解的收敛时间分别为18.25、14.87、14.37 min,固定解的收敛时间分别为11.75、8.87、8.50 min。

鉴于BDS的实时OSB产品在可用率和模糊度残差分布方面的良好表现,本文在实验日期内进行了BDS单系统的RT PPP-AR定位实验。图11

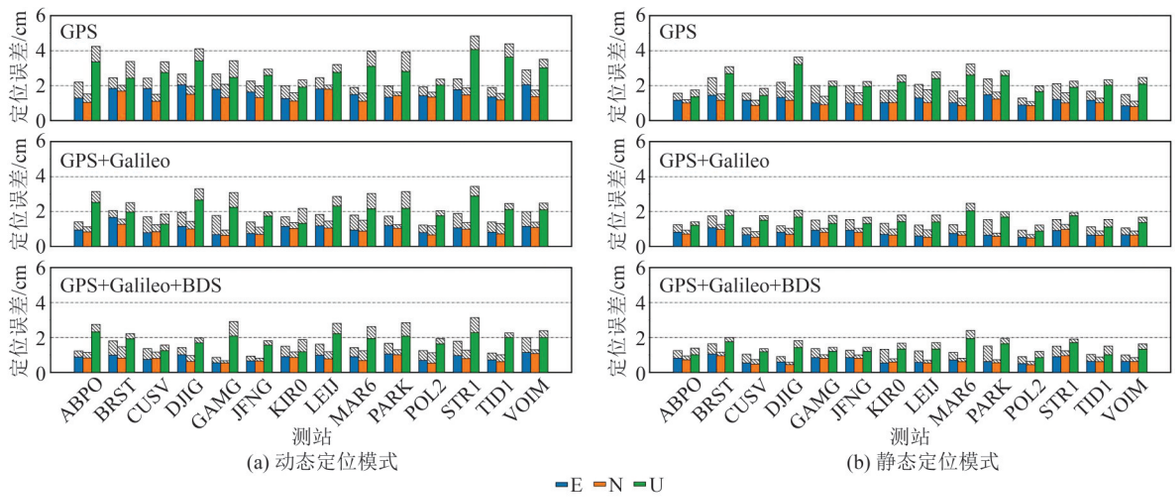


图 9　动态和静态PPP浮点解与固定解定位精度对比

Fig. 9　Precision Comparison Between PPP Float and Fixed Solutions of Dynamic Test and Static Test

表 6　动态和静态模式浮点解和固定解的定位误差 RMS

Table 6　Positioning Errors RMS of Float and Fixed Solutions of Dynamic Test and Static Test

模式	系统组合	浮点解/cm			固定解/cm			提升比例/%			固定率/%
		E	N	U	E	N	U	E	N	U	
动态	GPS	3.03	1.93	4.47	2.14	1.58	4.00	29.4	18.2	10.6	98.53
	GPS+Galileo	2.48	1.32	3.58	1.42	1.07	3.03	42.7	18.9	15.4	99.10
	GPS+Galileo+BDS	2.04	1.16	3.22	1.16	0.95	2.78	43.2	18.1	13.6	98.87
静态	GPS	2.42	1.22	3.12	1.60	1.04	2.74	33.8	14.8	12.2	98.60
	GPS+Galileo	1.96	0.95	2.50	1.15	0.76	2.24	41.3	20.0	10.4	99.30
	GPS+Galileo+BDS	1.92	0.91	2.31	1.10	0.72	2.06	42.7	20.8	10.8	99.01

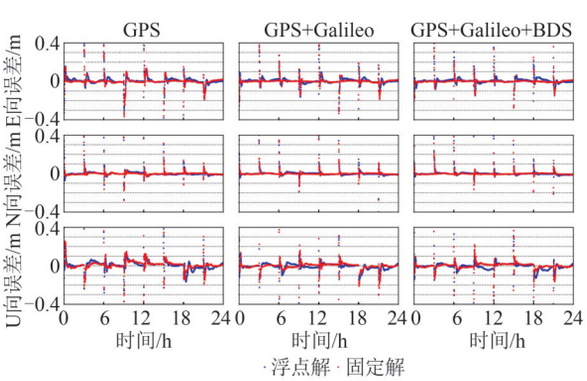


图 10　ABPO测站2022年DOY 291天浮点解与固定解定位结果(静态解)

Fig. 10　Positioning Results of Float and Fixed Solutions for ABPO in DOY 291,2022 (Static Test)

表 7　静态模式浮点解与固定解的平均定位误差 RMS 和收敛时间

Table 7　Average Positioning Errors RMS and Convergence Time of Float and Fixed Solutions of Static Test

系统组合	浮点解				固定解			
	E/cm	N/cm	U/cm	收敛时间/min	E/cm	N/cm	U/cm	收敛时间/min
GPS	2.31	1.04	3.09	18.25	1.52	0.69	2.55	11.75
GPS+Galileo	1.81	0.77	2.30	14.87	0.82	0.50	1.71	8.87
GPS+Galileo+BDS	1.79	0.67	2.30	14.37	0.56	0.50	1.68	8.50

给出了ALIC、LICC、ONSA 3个测站2022年DOY 291天BDS单系统定位结果的时序图,表8给出了定位误差和固定率的统计值。由图11可以看出,固定解相比浮点解在定位精度方面有显著提升,收敛后定位误差更小。由表8可以看出,BDS单系统模糊度固定成功率约为94%,说明CNES的OSB产品已经可以实现BDS单系统模糊度固定。

3　结　语

本文详细分析并评估了CNES提供的实时OSB产品质量,特别是CNES最新提供的BDS实时OSB产品。在此基础上,验证了基于该OSB产品的RT PPP-AR定位性能。研究结果可为诸多实时精密定位应用和用户提供重要参考。

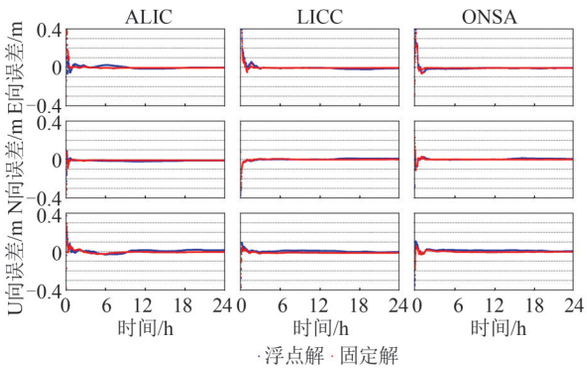


图11 ALIC、LICC、ONSA测站2022年DOY 291天浮点解与固定解定位结果(静态解)

Fig. 11 Positioning Results of Float and Fixed Solutions for ALIC, LICC and ONSA in DOY 291, 2022(Static Test)

表8 静态模式浮点解与固定解的平均定位误差RMS和固定率

Table 8 Average Positioning Errors RMS and Fixed Rate of Float and Fixed Solutions of Static Test

测站	浮点解			固定解			固定率/%
	E/cm	N/cm	U/cm	E/cm	N/cm	U/cm	
ALIC	1.14	1.45	1.61	0.58	0.82	1.05	94.49
LICC	1.31	0.58	0.73	0.95	0.32	1.30	94.33
ONSA	1.25	0.63	1.23	1.10	0.21	0.54	94.83

通过本文实验分析,得出以下主要结论:

1)在实时OSB产品质量方面,CNES提供的实时OSB产品在可用性、稳定性以及产品精度等方面均相对较好,其中GPS优于Galileo,BDS次之,总体而言,可以满足RT PPP-AR的应用需求。具体而言,在实时OSB产品可用率方面,GPS系统除G28卫星外,其实时OSB产品可用率均在90%以上;Galileo系统有3颗卫星(E02、E07、E21)实时OSB产品的可用率在60%~90%之间,其他均在90%以上;BDS系统除C01~C05卫星缺少实时相位OSB产品外,其他卫星实时OSB产品的可用率均在90%以上。GPS、Galileo、BDS卫星实时相位OSB产品日均STD值分别为0.085周、0.117周、0.228周。实时相位OSB产品稳定性方面,GPS略优于Galileo,远好于BDS。模糊度残差分析结果显示,GPS、Galileo、BDS的WL和NL模糊度残差在±0.25周内的分布占比分别为92.37%、95.88%、86.58%和88.40%、91.53%、87.42%。

2)在RT PPP定位性能评估方面,利用CNES提供的实时OSB产品单GPS可以实现E、N、U方向2.14 cm、1.58 cm、4.00 cm的动态定位精度,相比未进行OSB修正的浮点解PPP定位结果,定位精度提升分别为29.4%、18.2%、10.6%。而GPS+Galileo+BDS三系统组合动态RT PPP-AR定位精度在E、N、U方向分别为1.16 cm、0.95 cm和2.78 cm,相比于单GPS或GPS+Galileo定位,三系统组合RT PPP-AR可以显著提高定位精度,定位精度提升分别为45.8%、39.9%、30.5%和18.9%、11.2%、8.3%。在收敛时间方面,基于CNES实时OSB产品的GPS、GPS+Galileo、GPS+Galileo+BDS PPP-AR定位收敛时间分别为11.75 min、8.87 min、8.50 min,相比未做OSB修正的浮点解PPP结果,收敛时间可缩短40%以上。基于CNES实时OSB产品实现的BDS单系统模糊度固定解,其定位精度相比浮点解有显著提升,模糊度固定成功率约为94%。

参 考 文 献

[1] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data From Large Networks [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B3): 5005-5017.

[2] KOUBA J, HÉROUX P. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products[J]. *GPS Solutions*, 2001, 5(2): 12-28.

[3] 张小红, 李星星, 李盼. GNSS精密单点定位技术及应用进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1399-1407. ZHANG Xiaohong, LI Xingxing, LI Pan. Review of GNSS PPP and Its Application[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1399-1407.

[4] YANG F X, ZHAO L, LI L, et al. Performance Evaluation of Kinematic BDS/GNSS Real-Time Precise Point Positioning for Maritime Positioning [J]. *Journal of Navigation*, 2019, 72(1): 34-52.

[5] ELSOBEIEY M, AL-HARBI S. Performance of Real-Time Precise Point Positioning Using IGS Real-Time Service[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(3): 565-571.

[6] ALCAY S, TURGUT M. Evaluation of the Positioning Performance of Multi-GNSS RT-PPP Method [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(3): 155.

[7] LI B F, GE H B, BU Y H, et al. Comprehensive Assessment of Real-Time Precise Products From IGS Analysis Centers [J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 12.

[8] LAURICHESSE D, BLOT A. Fast PPP Convergence Using Multi-Constellation and Triple-Frequency Ambiguity Resolution[C]// The 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016), Portland, Oregon, USA, 2016.

[9] KAZMIERSKI K, HADAS T, SOŚNICA K. Weighting of Multi-GNSS Observations in Real-Time Precise Point Positioning[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(1): 84.

[10] LIU T, ZHANG B C, YUAN Y B, et al. Real-Time Precise Point Positioning (RT PPP) with Raw Observations and Its Application in Real-Time Regional Ionospheric VTEC Modeling[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(11): 1267-1283.

[11] 苏春阳, 舒宝, 郑蕾, 等. GPS/BDS实时SSR产品质量评估及其PPP性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(4): 714-726.
SU Chunyang, SHU Bao, ZHENG Lei, et al. Quality Evaluation and PPP Performance Analysis of GPS/BDS Real-Time SSR Products[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(4): 714-726.

[12] GE M, GENDT G, ROTHACHER M, et al. Resolution of GPS Carrier-Phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations [J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(7): 389-399.

[13] LAURICHESSE D, MERCIER F, BERTHIAS J P, et al. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination [J]. *NAVIGATION*, 2009, 56(2): 135-149.

[14] COLLINS P, BISNATH S, LAHAYE F, et al. Undifferenced GPS Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing [J]. *NAVIGATION*, 2010, 57(2): 123-135.

[15] REN X D, CHEN J, LI X X, et al. Multi-GNSS Contributions to Differential Code Biases Determination and Regional Ionospheric Modeling in China[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 65(1): 221-234.

[16] HU J H, ZHANG X H, LI P, et al. Multi-GNSS Fractional Cycle Bias Products Generation for GNSS Ambiguity-Fixed PPP at Wuhan University [J]. *GPS Solutions*, 2019, 24(1): 15.

[17] SCHAER S. Bias-SINEX Format and Implications for IGS Bias Products[C]//IGS Workshop, Sydney, Australia, 2016.

[18] SCHAER S, VILLIGER A, ARNOLD D, et al. New Ambiguity-Fixed IGS Clock Analysis Products at CODE[C]//IGS Workshop, Wuhan, China. 2018.

[19] MELBOURNE W G. The Case for Ranging in GPS-Based Geodetic Systems[C]// The 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville, Maryland, USA, 1985.

[20] WÜBBENA G. Software Developments for Geodetic Positioning with GPS Using TI-4100 Code and Carrier Measurements[C]//The 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville, Maryland, USA, 1985.

[21] LI X, LI X X, JIANG Z H, et al. A Unified Model of GNSS Phase/Code Bias Calibration for PPP Ambiguity Resolution with GPS, BDS, Galileo and GLONASS Multi-Frequency Observations [J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(3): 84.

[22] DU S, SHU B, XIE W, et al. Evaluation of Real-Time Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution Based on Multi-GNSS OSB Products from CNES[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(19): 4970.

[23] HATCH R. The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements[C]// The Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, Las Cruces, New Mexico, USA, 1982.

[24] LIU T J, JIANG W P, LAURICHESSE D, et al. Assessing GPS/Galileo Real-Time Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution Based on Phase Biases From CNES[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 66(4): 810-825.

[25] GENG J. Rapid Re-convergence in Real-Time Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution [C]//The 22nd International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2009), Savannah, USA, 2009.

[26] LI X X, GE M R, ZHANG H P, et al. A Method for Improving Uncalibrated Phase Delay Estimation and Ambiguity-Fixing in Real-Time Precise Point Positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(5): 405-416.

[27] LIU X L, GOODE M, TEGEDOR J, et al. Real-Time Multi-Constellation Precise Point Positioning with Integer Ambiguity Resolution[C]// International Association of Institutes of Navigation World Congress (IAIN), Prague, Czech Republic, 2015.

[28] TEUNISSEN P J G. The Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment: A Method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation[J]. *Journal of Geodesy*, 1995, 70(1): 65-82.

[29] QIN H L, LIU P, CONG L, et al. Ambiguity of Residual Constraint-Based Precise Point Positioning with Partial Ambiguity Resolution Under no Real-Time Network Corrections Using Real Global Positioning System (GPS) Data[J]. *Sensors*, 2020, 20 (11): 3220.

[30] 闫忠宝, 张小红. GNSS非组合PPP部分模糊度固定方法与结果分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(6): 979-989.

YAN Zhongbao, ZHANG Xiaohong. Partial Ambiguity Resolution Method and Results Analysis for GNSS Uncombined PPP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 979-989.

[31] KOUBA J. A Guide to Using International GNSS Service (IGS) Products[EB/OL]. https://files.igs.org/pub/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21_cor.pdf, 2009.

[32] LOYER S, BANVILLE S, GENG J H, et al. Exchanging Satellite Attitude Quaternions for Improved GNSS Data Processing Consistency[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68(6): 2441-2452.

[33] WU J T, WU S C, HAJJ G A, et al. Effects of Antenna Orientation on GPS Carrier Phase[J]. *Manuscripta Geodaetica*, 1993, 18(2): 91-98.

[34] 尹潇, 柴洪洲, 齐文龙, 等. Galileo校正卫星天线参数特性及对PPP定位的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(4): 526-532.
YIN Xiao, CHAI Hongzhou, QI Wenlong, et al. Characteristics of Galileo Calibrated Satellite Antenna Parameter and Their Impacts on Precise Point Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(4): 526-532.

[35] ZHANG L, YANG H Z, GAO Y, et al. Evaluation and Analysis of Real-Time Precise Orbits and Clocks Products From Different IGS Analysis Centers[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61(12): 2942-2954.

[36] WANG J, ZHANG Q, HUANG G W. Estimation of Fractional Cycle Bias for GPS/BDS-2/Galileo Based on International GNSS Monitoring and Assessment System Observations Using the Uncombined PPP Model[J]. *Satellite Navigation*, 2021, 2(1): 9.

[37] WANG J, HUANG G W, YANG Y X, et al. FCB Estimation with Three Different PPP Models: Equivalence Analysis and Experiment Tests[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(4): 93.

(上接第2259页)

学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1557-1565.
LI Deren. From the Luojia Series Satellites to the Oriental Smart Eye Constellation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1557-1565.

[16] 刘会增, 石铁柱, 王俊杰, 等. 利用区域土壤光谱库研究土壤有机碳反演模型传递性[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(7): 889-895.
LIU Huizeng, SHI Tiezhu, WANG Junjie, et al. Transferability of Retrieval Models for Estimating Soil Organic Carbon Contents Based on Regional Soil Spectral Libraries[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(7): 889-895.

[17] 王宇, 杨丽萍, 任杰, 等. 联合ALOS-2和Landsat 8的绿洲土壤水分反演模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(9): 1630-1638.
WANG Yu, YANG Liping, REN Jie, et al. An Oasis Soil Moisture Inversion Model Using ALOS-2 and Landsat 8 Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(9): 1630-1638.

[18] CARTER M, BENTLEY S P. Soil Properties and Their Correlations[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.

[19] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition[C]// International Conference on Learning Representations. Banff, Canada, 2014.

[20] HENGL T, DE JESUS J M, HEUVELINK G B M, et al. SoilGrids250m: Global Gridded Soil Information Based on Machine Learning[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0169748.

[21] POGGIO L, DE SOUSA L M, BATJES N H, et al. SoilGrids 2.0: Producing Soil Information for the Globe with Quantified Spatial Uncertainty[J]. *Soil*, 2021, 7(1): 217-240.

[22] ZOU W L, HAN Z, DING L Q, et al. Predicting Resilient Modulus of Compacted Subgrade Soils Under Influences of Freeze-Thaw Cycles and Moisture Using Gene Expression Programming and Artificial Neural Network Approaches[J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 28: 100520.

[23] TASORA A, SERBAN R, MAZHAR H, et al. Chrono: An Open Source Multi-Physics Dynamics Engine[C]// International Conference on High Performance Computing in Science and Engineering. Soláň, Czech Republic, 2015.

[24] KRENN R, GIBBESCH A. Soft Soil Contact Modeling Technique for Multi-Body System Simulation[J]. *Trends in Computational Contact Mechanics*, 2011: 135-155.